

補綴冠接着層の破壊の拡大に関する考察(続)

著者	桜岡 充
雑誌名	日本歯科大学紀要. 一般教育系
巻	19
ページ	45-54
発行年	1990-03-20
URL	http://doi.org/10.14983/00000358



補綴冠接着層の破壊の拡大に関する考察

(続)

On the Ingravescient Progress of a Fracture in the Cement Layer
between a Restored Crown and the Tooth Structure (II)

新潟歯学部 桜 岡 充

Mitsuru SAKURAOKA : The Nippon Dental University, Hamaura-cho 1-8,
Niigata 951, JAPAN

(1989 年 12 月 1 日 受理)

Abstract

Concentrated fracture stresses in the cement layer induced by simulated functional loads to a restored tooth with casting gold crown are estimated by use of finite element method.

The cured cement is assumed to be a "brittle material" in the sense of fracture mechanics. And as a classic example, zinc phosphate cement is adopted in this study.

The progress of a fracture in the cement layer, and the crown retentivity with spreading fracture are reported.

要旨：完全冠装着臼歯に対して、平面歪条件下での単純化模型を考え、これの外力作用下における挙動を静弾性力学の観点より調べる。この小論では接着剤層は破壊力学における脆性材料であるとし、また、典型例として亜鉛リン酸セメントを用いて金合金冠を装着した場合を問題にする。外力作用に起因する接着剤層の破壊（凝集破壊）による冠脱落への過程（破壊の拡大過程）を有限要素法で解析し報告する。

諸 言

装着冠脱落の一形態に接着剤層の破壊（凝集破壊）によるものがある。拙著〔有限要素応力解析に基づく冠補綴物と歯科接着剤の材質的適合性、本誌16号、33（1987）；以下これを前論文で参照する。*〕において補綴冠、接着剤、歯質の硬さと凝集破壊による冠の脱落との間の関連を調べた。その際、凝集破壊の進展は以下のものであろうとの仮説の下で議論を進めている：

“咀嚼あるいは咬合時の外力によって接着剤層内に誘起された集中応力は、その接着剤材質の固有の強度（RFS）を超えたときその場所に fine crack を生ぜしめる。そうすると接着剤層中のその部分はもはや stress を分担しなくなるので応力集中点は別の場所へ移動し、そこに再び fine crack が生み出される。この繰返しによって fine crack は大きな crack に成長してゆく。そしてついには接着剤層が崩壊し補綴冠の脱落に到る。従って凝集破壊の第一段階は応力集中点に fine crack が生み出されることである。

引き続いて起る crack の拡大は、この最初の段階よりは容易に、つまり小さな外力でも誘引される。そしてこの第一撃：first fine crack を与え得る potentiality は接着剤層中に誘起される集中破壊応力の最大値そのものである。結局、冠の保持力は接着剤層内に出現する最大破壊応力（OMTS）〔硬化後の接着剤は、おおむね脆性材料であるので OMTS は最大引張応力である。（脆性材料の破壊〔脆性破壊〕が引張応力に支配されることは材料強度学や構造解析の常識であるが、例えば小寺沢良一：材料強度学要論、マグロウヒルブック(株)、東京、1979；岡村 弘之：線形破壊力学入門、培風館、東京1976；を参照されたい。〕〕に反比例することになる。勿論、保持力は接着剤それ自体の強度にも比例するので

*) この小論では参考文献の不必要な羅列は省略する。儀礼的な参照は論理を不明解にする効果の方が大きく、また、科学にとって無意味であると思われるからである。

$$R(\text{冠の保持力}) \propto \frac{(\text{接着剤の強度: RFS})}{(\text{接着剤層中に誘起され得る最大破壊応力: OMTS})} \dots\dots(1)$$

とかける。こう表現した時の比例定数は歯牙の種類, 支台歯や冠の型や精度, 装着時の技術差, 水や酸に対する漏洩の多寡等々によって異なってくる。”

この第一撃であるところの first fine crack から冠脱落に到る凝集破壊の拡大過程を computer simulation により解析し, 接着剤層の破壊の伝播の様子と破壊進行と共に冠の保持力が減少してゆく様子を報告するのが本小論の目的である。

model の詳細と解析条件

この小論で対象とする補綴処置歯を Fig. 1 に与えてある。pulp は空洞で近似し象牙質は均質等方的であって歯根先端部で固定されているとする二次元平面歪問題として解析を進める。鑄造冠, 接着剤および象牙質の Young 率(E), Poisson 比(ν)として以下の値を用いる [以下の文献より採用した; 甘利光治 他五名: 荷重方向の差異による鑄造冠合着セメント層の力学的挙動について, 補綴誌 25, 15 (1981)]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{鑄造冠 (金合金)} & : E=9.3 \times 10^4 \text{ MPa}, \nu=0.33 \\ \text{cement (Zn-P)} & : E=8.8 \times 10^3 \text{ MPa}, \nu=0.35 \dots\dots\dots(2) \\ \text{象牙質} & : E=1.2 \times 10^4 \text{ MPa}, \nu=0.30 \end{array} \right.$$

(なお, 解析対象のこの種の高度な単純化の理由に関しては前論文に詳述してあるので参照されたい。)

ところで冠装着歯に作用する外力は極めて多岐にわたる。これらの多様な外力の中で接

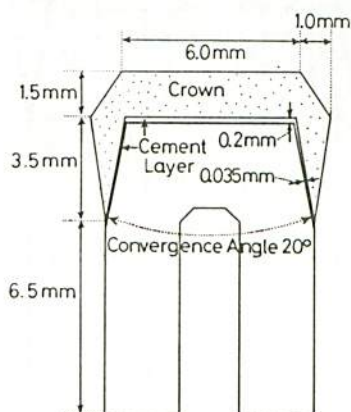


Fig. 1 Geometry of the restored tooth model
完全冠装着歯の模型。

着剤層に第一の打撃：fine crack を作り出す外力とはどのようなものであろうか。これは歯牙に作用する外力で圧倒的に大きなもの、疑う余地なくそれは咀嚼咬合時の力であろう。そこでこの小論では上記の凝集破壊に対し決定的に有効な外力を Fig. 2 に描いた単位の大きさ (1 mm^{-1}) の7種の外力 (potential load) で代表させることにする。つまり冠装着歯には咬合圧の外にも粘着力や摩擦力等の、歯軸方向に対して垂直あるいはそれ以上の角度をもつ外力も加わる事は勿論である。これらの合力としての外力で圧倒的に大きく凝集破壊に決定的と考えられるものを load 1～load 7 の7種の力 (effective load) で代

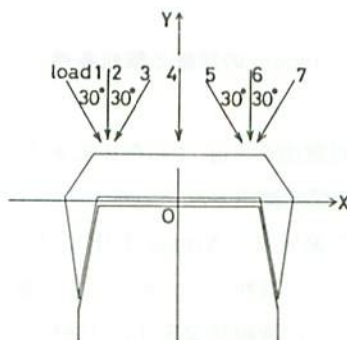


Fig. 2 An orthogonal coordinate system, O-xy, and the seven functional loads.

7種の外力と座標の導入。

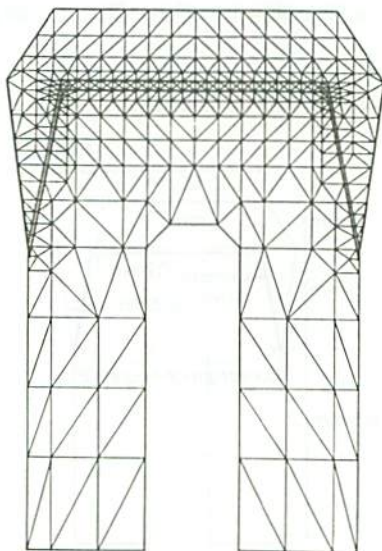


Fig. 3 Finite element mesh for the model tooth.

要素分割の説明。

表させようという訳である。これら7種の外力が独立に作用したという7つの場合すべてを考える事によって解析を進めるという事である。

さて、load 1-7のいずれかの外力が冠装着歯に作用したとき、接着剤層内には対応する分布応力が誘起される訳であるがこれを知るにはその条件下で静弾性方程式を解かねばならない。然るに Fig. 1 のような極めて単純な形状についてさえ厳密解は不可能なのである。そこで有限要素法という強力な近似解法で解を求め話を進める事になる。要素分割は Fig. 3 のように行った。補綴冠、接着剤、象牙質の分割要素数はそれぞれ 268, 158, 287 である。

さて、7種の外力が次々に作用したとき、接着剤層の破壊（脆性破壊である。）を支配する最大引張応力（OMTS）が接着剤層の“ある分割要素”に出現したとしよう。[前論文によれば、これは load 3（勿論 load 5 も全く対称なので同じであるが。）が作用した場合実現する。] この値が接着剤固有の強度（RFS）を超えているときその要素内に crack が出現し破壊が始まる。そこで、今、分割要素Aに OMTS が出現しその要素が破壊されたとしよう。連続する咀嚼咬合連動の際の外力、Fig. 2 の7種の外力がそれぞれ独立に cyclic に反復作用している場合、先程破壊された要素Aは応力を分担しない事になる。*) 従って第2段階の破壊を見ようとするとき、問題の既破壊要素Aは空洞になったと近似して、再び7種の外力が次々に作用した時の OMTS とそれが出現する分割要素B（つまり2番目に破壊される要素）を計算する。次には、これら2つの分割要素A、Bを空洞として第3の破壊要素Cと OMTS を計算する。これを繰り返すことによって凝集破壊の“進行の様子”と“破壊の進捗度に応じた OMTS の増大=接着剤層が破壊されやすくなってゆくゆき方”を simulate する事ができる。

結 果 と 考 察

Fig. 4 に要素破壊の各段階ごとに、つまり7種の外力がそれぞれ独立に作用する cycle ごとに7種の力が与える最大破壊応力（引張応力）MTS の全てを plot してある。[但し歯牙は歯軸に対して対称であり、外力も1と7、2と6、3と5が対称である。第1段階での破壊は load 3 によって重心が（-3.474 mm, -3.317 mm）の分割要素で（後述の Fig. 5 で提示するように左側 margin 部分）で発生するとして描いたが、load 5 によって

*) crack 面は全く平らな破断面ではなく friction も生じ、又、圧縮力も伝播するので大きな量ではないが完全に応力分担が0ということはない。ここでも0と近似して議論を進める訳である。

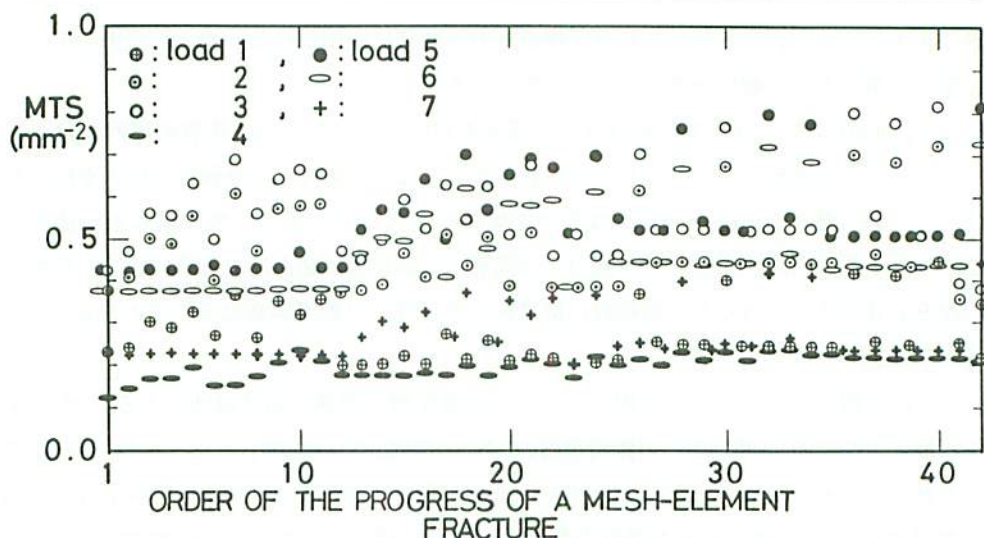


Fig. 4 The maximum fracture stress (MTS) induced by each of seven external loads.

破壊の各段階において7外力のそれぞれが与える最大破壊応力 (MTS)。

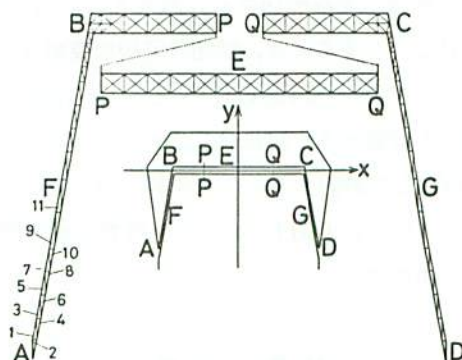


Fig. 5 Eleven elements fractured at the beginning. The numbers, 1, 2, ..., indicate the orders of fracture.

最初に破壊される11個の分割要素。数字は破壊の順序を表す。

重心座標 (3.474 mm, -3.317 mm) の分割要素内に誘起される破壊応力も同じ大きさであるので、こちらを最初の破壊要素であるとして描いても内容は全く同じ意味である。この種の二者択一は、cement layerの破壊が左右対称になった時は常に起る訳で (例えば23段階や26段階での破壊でもそうである。) 適宜一方を選んでその要素が破壊された=空洞になったとして解析を進めた。] 単位の大さの外力であっても作用する歯牙の部位や、その向きによって cement layer に与える効果は当然ながら可成違っている。Table 1に破壊の進行の順序を追って、最も効果的な外力番号、破壊される要素の重心座標、

TAB 1. The number of the most effective external load, a magnitude of the maximum fracture stress (OMTS), the center of the mesh element in which OMTS appears and the direction of OMTS, at each step of the progress of a fracture. The direction of OMTS means a direction of the surface to which OMTS realizes and expressed by the angle (degree) from the horizontal to the surface determined counterclockwise.

破壊の各進行段階において、最も効果的に破壊を引き起す外力番号と、その外力に対する最大破壊応力 (OMTS)、破壊される分割要素の重心座標および OMTS の出現する面の x 軸正方面より反時計回りに測った角度 (度)。

破壊の段階	OMTS を与える外力	破壊される要素の重心(mm)		OMTS (mm ⁻²)	OMTS の向き (度)
		x 座標	y 座標		
1	3	-3.474	-3.313	0.423	27.9
2	3	-3.488	-3.476	0.471	26.9
3	3	-3.429	-3.067	0.559	31.6
4	3	-3.447	-3.233	0.557	29.2
5	3	-3.385	-2.817	0.633	33.0
6	3	-3.403	-2.983	0.498	29.5
7	3	-3.341	-2.567	0.690	32.7
8	3	-3.359	-2.733	0.561	29.1
9	3	-3.288	-2.267	0.643	33.5
10	3	-3.315	-2.483	0.671	30.4
11	3	-3.341	-2.567	0.690	32.7
12	3	3.488	-3.467	0.473	68.2
13	5	3.474	-3.317	0.523	-33.3
14	5	3.429	-3.067	0.570	-31.6
15	3	3.447	-3.233	0.590	61.8
16	5	3.385	-2.817	0.645	-33.0
17	3	3.403	-2.983	0.631	61.8
18	5	3.341	-2.567	0.703	-32.7
19	3	3.359	-2.733	0.627	62.3
20	5	3.288	-2.267	0.656	-33.5
21	5	3.315	-2.483	0.682	-30.4
22	5	3.221	-1.883	0.671	-32.0
23	3	3.253	-2.133	0.509	64.2
24	5	3.162	-1.550	0.700	-32.5
25	5	-3.253	-2.133	0.550	115.9
26	3	-3.162	-1.550	0.703	32.5
27	5	3.188	-1.767	0.523	-28.8
28	5	3.112	-1.267	0.764	-32.5
29	5	-3.188	-1.767	0.535	116.1
30	3	-3.112	-1.267	0.768	32.5
31	5	3.133	-1.450	0.522	-28.6
32	5	3.068	-1.017	0.798	-33.0
33	5	3.086	-1.183	0.552	-29.2
34	5	3.024	-0.767	0.772	-32.8
35	3	-3.133	-1.450	0.526	28.6
36	3	-3.068	-1.017	0.803	33.0
37	3	-3.086	-1.183	0.557	29.1
38	3	-3.024	-0.767	0.778	32.8
39	3	-3.042	-0.933	0.511	28.7
40	3	-2.987	-0.550	0.813	32.5
41	5	3.042	-0.933	0.512	-28.7
42	5	2.986	-0.550	0.813	-32.5

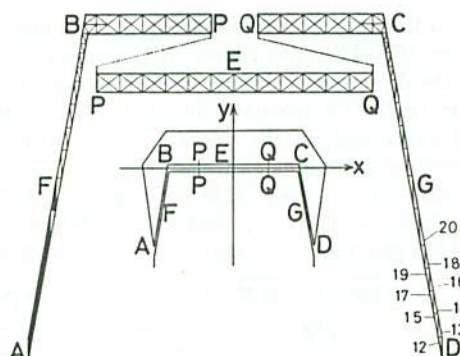


Fig. 6 Nine elements fractured in the orders from 12th to 20th. A blacked out device indicates the previously fractured part of the cement layer.
12 番目から 20 番目までに破壊される要素。既破壊要素は黒く塗りつぶしてある。

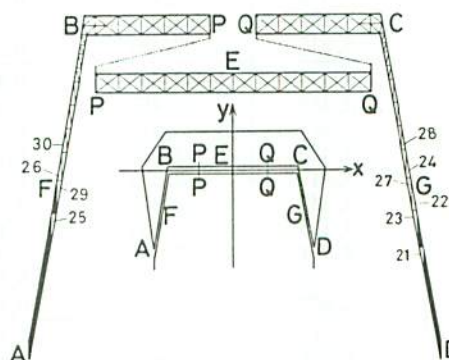


Fig. 7 Ten elements fractured in the orders from 21st to 30th.
21 番目から 30 番目までの被破壊要素。

OMTS の値 (Fig. 4 に与えた 7 個の MTS の最大のもの。) を 42 番目まで示してある。また, Fig. 5 に 1 番から 11 番目までの被破壊要素を順番を書き込んだ上で示した。さらに Fig. 6—Fig. 8 にはその後の破壊の進行を既破壊要素を黒く塗り潰した上で示してある。Figs 5—8 と Fig. 4 から, 非対称の程度の大きな外力は cement layer により大きな破壊応力 (MTS) を与えているのが解る。この事実は我々の直感と見事に一致していると言って良いであろう。

次には, cement 層は歯牙側に比べて冠側の要素が先に破壊されている。従って臨症的に, 凝集破壊に基づく補綴冠脱落を観察するならば接着剤は支台歯側に附着して残るはずである。増原 [増原英一: 接着の基礎理論と材料の性質, 歯界展望: 別冊 歯科臨床と接着, 19 (1983)] による臨症例所見と一致する。(この事情をさらに明解に見るには,

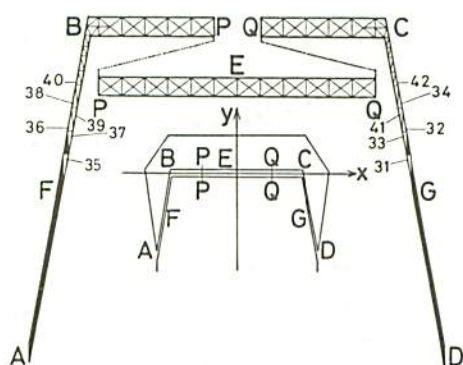


Fig. 8 Twelve elements fractured in the orders from 31st to 42nd.
31 番目から 42 番目までの被破壊要素。

cement 層の要素分割をさらに細かくすれば良い訳である。)

さて、TAB. 1 より同一の大きさの外力が作用した場合、接着剤層の破壊の進行と共に残存接着剤層内に現われる最大破壊応力 OMTS は増大してゆく。つまり当然のことであるが破壊されやすくなってゆく訳である。このように接着剤層中に第一撃：first fine crack を作り出すのが最も大変なのであって、その後はいく分容易に破壊が進行するのである。こうして、冠の保持力は first fine crack を与える外力の大きさに比例するとした前論文の仮定は側面から支持されることになる。TAB. 1 の OMTS の値は、従って、凝集破壊の進行と共に冠の保持力 R がどの様に減少してゆくかを代表する量なのである。

つまり(1)より

$$R \propto \frac{1}{(\text{OMTS})} \dots\dots\dots (3)$$

であるので、Fig. 9 の破壊の進行と保持力低下の関係を示す graph は既破壊要素の数を横軸に、 $(\text{OMTS})^{-1}$ を縦軸にとって描いたものである。担し全然破壊がない時の $(\text{OMTS})^{-1}$ を 1 と規格化して描いてある。この図で注意すべき事は、いくつかの要素が崩壊した後の文字通りの冠の保持力は Fig. 9 でそれ以後の最高点で与えられると考えるべきである。なぜならば R の低い段階の破壊は前の破壊と同時に進行してしまっているはずだからである。R の比較的大きな段階で破壊の進行が止る（可能性を持っている）訳である。

ここで蛇足ではあるが以下の点に触れておこう。これまで破壊の順番というものを考えてきたが、これは凝集破壊が 7 種の作用外力の周期ごとに一段階ずつ進行すると言っているのでは決してない。接着剤層破壊の全段階が一度に進行する場合もあるし、又、今の 11 番目までの崩壊が一度の咀嚼咬合時に起る事もある訳である。破壊の発生と共に可成

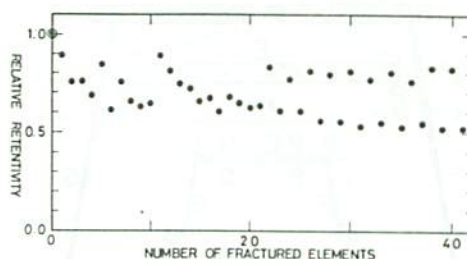


Fig. 9 Relation between the fracture toughness and the progress of a fracture in the cement layer. The original (pre-fractured) toughness has been normalized to unity.

破壊の進行と破壊靱性低下の説明。既破壊分割要素数に対する次の段階の破壊強さ。破壊強さは接着剤層が無欠陥であった最初の状態のそれで規格化して描いてある。

大規模な崩壊を瞬時にともなうことがあるのが脆性破壊の特徴でもある。上の解析は、接着剤層が破壊のある段階での形状をしている補綴処置歯に外力が作用した時、その接着剤層がどのように破壊応力にさらされるかを見たのである。従って、咀嚼咬合の周期ごとの接着剤層崩壊の時間的進行の一段階一段階を破壊の順番と主張している訳ではない。

Fig. 9を見ると cement 層崩壊の進行と共に保持力は余り急激には減少しない。著者は前に crown 及び cement の Young 率が

$$\begin{cases} E(\text{crown}) = 1.8 \times 10^4 \text{ MPa} \\ E(\text{cement}) = 4.2 \times 10^3 \text{ MPa} \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

という可成軟かすぎる場合に同様の解析を行っている [本誌 18 号, 11 (1989)]。 (4) の場合、主に咬合面の cement 層破壊が進行し崩壊の進行と共に急速に保持力は減少した。

(2)で与えられる今の場合は辺縁部から破壊が始まる訳であるがRの変化の様子が劇的に違っている。Fig. 8 で表現されるような可成崩壊が進んだ後でも 8 割程度の破壊靱性を保持しているのである。つまり、少し位 margin 部の cement が破断したとしても、あるいは、装着の際 辺縁部に cement 層の不完全な部分でできてしまっても 咀嚼咬合に基づく冠の脱落には決定的な影響を与えないのである。この結果は予想と少々ずれる印象を与えるが、外力による集中応力での脆性破壊という一面だけを考えるならば弾性力学は上記の結論に導くのである。つまり、margin 部の cement 層の少々の欠損などでは冠の保持力は決定的影響を受けない。然しながら、臨症的には漏洩の問題等とからんで二次齲蝕の進入、拡大等 margin 部の不完全による demerit は測り知れないものがある事は論を持たない。